

## ВЫБОР АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ ПО ПРИЖОГАМ ЗАКАЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2015

**Я.И. Солер**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»  
**Д.Ю. Казимиров**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»  
**В.Л. Нгуен**, аспирант кафедры «Технология машиностроения»  
 Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск (Россия)

**Ключевые слова:** шлифование; прижоги; микротвердость; статистика; среднее; медиана; прецизионность процесса; цифровые технологии.

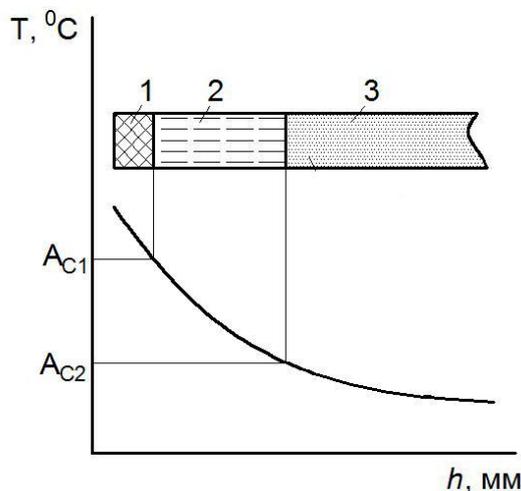
**Аннотация:** Разработана методика количественной оценки прижогов на базе цифровых технологий, которая включает три этапа: макросъемку исходной поверхности в отраженных лучах света; ее оцифровку в программе *Adobe Photoshop CS6 13.1.2* и конвертирование в виде растровых изображений различных оттенков. Ее положительными качествами являются: низкая трудоемкость, экологическая безопасность, возможность широкого использования в любых научных целях и производственных условиях. Она апробирована в условиях маятникового шлифования плоских деталей из закаленной стали 30ХГСА ( $\sigma_B=1080$  МПа,  $\delta=10\%$ ). Шлифование вели различными кругами по зернам, твердости и пористости: 25AF46K10V5-ПОЗ, 25AF46L10V5-КФ35, (92A, 25A)F46L6V24, 25AF46M12V5-ПОЗ, ЕКЕ46К3V.

Для подтверждения надежности предложенной инновационной технологии оценки прижогов параллельно проведено исследование микротвердости деталей. Учитывая стохастическую природу шлифования, для обработки наблюдений по обоим выходным параметрам шлифования привлечены статистические методы, которые разделяются на параметрические и непараметрические (в частности, ранговые). Их достоинствами является возможность принятия статистических решений с заданной надежностью, а также оценка режущих способностей кругов не только по мерам положения (средним, медианам), но и рассеяния: стандартам отклонений, размахам и квартильным широтам. Вторая характеристика одномерного распределения частот наиболее важна при шлифовании ответственных деталей на настроенных станках с целью снижения вероятности брака. Показано, что в условиях нарушений гомоскедастичности и нормальности распределений следует воспользоваться непараметрическим методом, в котором в качестве одномерных распределений частот используются медианы и квартильные широты. Выявлена корреляционная связь между мерами положения для плотностей прижогов и микротвердости при шлифовании абразивными кругами на режиме:  $v_k=35$  м/с,  $s_{пр}=7$  м/мин,  $s_n=1$  мм/дв.ход,  $t=0,015$  мм,  $z=0,15$  мм, при которой увеличение прижогов сопровождается снижением микротвердости деталей 30ХГСА. Наилучшие результаты по мерам положения занял круг 25AF46K10V5-ПОЗ. По прецизионности шлифования наибольшую стабильность показал круг 25AF46L10V5-КФ35.

### ВВЕДЕНИЕ

Прижоги – одна из наиболее распространенных и сложных «болезней» шлифования закаленных сталей жесткими кругами. Их появление может привести к значительному снижению твердости шлифованной поверхности, усталостной прочности, износоустойчивости и, как следствие, долговечности деталей машин [1; 2]. Образование прижогов связано с тепловыми явлениями, возникающими в процессе шлифования металлов. Их источником являются абразивные зерна, которые с учетом расположения в радиальном направлении разделяются на три группы: режущие, давящие и нережущие. Наиболее выступающие абразивные зерна первоначально производят упругую деформацию металла, затем пластическую и по достижении контактных напряжений, превышающих предел прочности металла, срезание стружки. Тепло образуется преимущественно в результате трения абразивных зерен по ювенильной поверхности только что обработанного металла и энергии, расходуемой на упругую и пластическую деформации. При этом на первых двух этапах контакта режущих зерен с металлом температура шлифуемой поверхности оказывается даже выше, чем при снятии стружки. Мгновенный нагрев поверхности заготовки может составлять 700–800 °С и приводить ее к локальному оплавлению. При этом скорость нагрева достигает 5000–6000 °С/с и даже до 10000 °С/с. Тепловое поле заготовки характеризуется высоким градиентом и сосредотачивается в поверхностном слое глубиной до  $h=0,1–0,3$  мм (рис. 1). Практически за доли секунды эта температура снижается, т. к. основ-

ная часть тепла отводится в нижележащие слои холодного металла. При интенсивном съеме металла температуры нагрева могут быть выше фазового превращения (линии  $A_{c1}$ ). Нагретый металл, взаимодействуя с охлаждающей средой, приобретает пониженную или повышенную твердость поверхностного слоя детали. При этом в сталях с мартенситной и сорбитной структурой возможна вторичная закалка [3; 4].



**Рис. 1.** Распределение температуры по глубине детали: 1 – слой вторичной закалки; 2 – слой вторичного отпуска; 3 – исходное состояние закаленной стали [1]

В работах [5–7] прижоги классифицированы на две группы: закалки и отпуска. В первом случае в результате нагрева металла выше линии  $A_{c1}$  (рис. 1) образующийся при шлифовании аустенит при остывании деталей не достигает полного обратного мартенситного превращения. Это связано с тем, что в результате больших удельных давлений, оказываемых абразивными зернами на их поверхности, и скорости движения теплового источника нижняя граница мартенситного превращения смещается ниже  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В силу изложенного на поверхности детали фиксируется структура аустенита закалки, который может иметь две схемы превращений: диффузионную «мартенсит – перлит – аустенит»; бездиффузионную «мартенсит – аустенит». В первом случае протекает выход углерода из кристаллической решетки мартенсита в зоне температуры отпуска, а при дальнейшем повышении нагрева  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращение и растворение углерода в  $\gamma\text{-Fe}$ , т. е. образование аустенита. Бездиффузионная схема обратного мартенситного превращения предполагает только сдвиг кристаллической решетки при минимальном времени воздействия теплового источника ( $10^{-11}\text{ с}$ ). Прижоги второй группы протекают в третьем превращении отпуска, когда углерод полностью выходит из решетки мартенсита. При этом образуется феррит, а в результате реакции между ним и выделившимся углеродом – цементит (перлит).

Прижогам посвящено большое количество исследований, в которых используются следующие методы их контроля: химическое травление [1; 8]; измерение на поверхности деталей флуктуации физического параметра, в качестве которого принята работа выхода электронов [9]; выявление прижогов по электризации и свечению их зон в ультрафиолетовом свете после нанесения специального вещества на поверхность [10]; рентгеновский [11]; обнаружение прижогов с использованием эффекта Баркгаузена по анализу шумов [12; 13]. Анализ этих работ показывает, что большинство из них обладает высокой трудоемкостью, трудно автоматизируется и не всегда дает количественную оценку прижогов.

Нами разработана методика, впервые апробированная в работе [14], которая позволяет провести количественный контроль прижогов с использованием цифровых технологий. Данный метод включает в себя три этапа: макросъемку исходной поверхности в отраженных лучах света; ее оцифровку в программе *Adobe Photoshop CS6 13.1.2* и конвертирование в виде растровых изображений цветов с возможными оттенками не более 16. Ее положительными качествами являются: низкая трудоемкость, экологическая безопасность, возможность широкого использования в любых научных целях и производственных условиях. Сказанное в конечном результате позволяет предсказать количественную оценку интенсивности прижогов.

Задачей данной работы является количественная оценка прижогов с использованием инновационной технологии [14], которая позволяет повысить качество изготовления ответственных деталей из закаленной стали 30ХГСА, в частности, путем выбора абразивных кругов по минимальному тепловому воздействию на поверхность.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент проведен при следующих неизменных условиях: плоскошлифовальный станок с прямоугольным столом модели 3Г71; детали из закаленной стали 30ХГСА ( $\sigma_b=1080\text{ МПа}$ ,  $\delta=10\%$ ) с размерами  $L \times B \times H=40 \times 50 \times 40\text{ мм}$ , шлифуемые по поверхности с размерами  $L \times B$ ; число повторений опытов:  $n=10$  – при оценке прижогов,  $n=30$  – при измерении микротвердости; СОЖ – 5 %-ная эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7–10 л/мин; правка круга алмазным карандашом перед шлифованием каждой детали; режим обработки – скорость резания  $v_k=35\text{ м/с}$ , продольная подача  $s_{np}=7\text{ мм/мин}$ , поперечная подача  $s_n=1\text{ мм/дв.ход}$ , глубина резания  $t=0,015\text{ мм}$ , операционный припуск  $z=0,15\text{ мм}$ . Шлифование вели абразивными кругами формы 1 с размерами  $250 \times 20 \times 76\text{ мм}$ . Их характеристики представлены кодом  $e=\overline{1;5}$ , который удобен при статистической обработке наблюдений: 1 – 25AF46K10V5-ПО3; 2 – 25AF46L10V5-КФ35; 3 – (92A, 25A)F46L6V24; 4 – 25AF46M12V5-ПО3; 5 – ЕКЕ46К3V. Инструменты  $e=1;4$  изготовлены Лужским абразивным заводом (г. Луга);  $e=2;3$  – Петербургским абразивным заводом «Ильич» (г. Санкт-Петербург);  $e=5$  – фирмой *Dorfner schleifmittelwerk* (Германия) способом литья из зерен монокорунда ЕКЕ со средней структурой (К) и мягкой твердостью (3). Круги  $e=1;2;4$  являются высокопористыми (ВПК), имеющими различные порообразующие добавки: ПО3, КФ35.

После шлифования поверхность изделия обезжирили. Съемку, ее оцифровку и конвертирование вели по методике, представленной в работах [14; 15]. При этом количество прижогов для каждой из деталей  $v=\overline{1;10}$ , прошлифованных кругом  $e$ , оценивается инновационным показателем:

$$P_{ev} = \left( \frac{\sum P_{i\text{inp}}}{\sum P_i} \right)_{ev} \times 100\%, \quad e = \overline{1;5}, \quad (1)$$

где  $P_{ev}$  – плотность прижогов поверхности  $v$ -й детали в процентах;

$\sum P_{i\text{inp}}$  – общее количество пикселей цветов прижогов  $i = \overline{1;3}$ ,

$\sum P_{ei}$  – общее количество всех пикселей при переменной  $i = \overline{1;15}$  (см. таблицу 1).

Микротвердость шлифованных поверхностей деталей  $HV_e$  измерена на приборе ПМТ-3 по методике [16]. Ее величины позволяют оценить адекватность предлагаемой методики количественного содержания прижогов и выявить физические явления, протекающие при шлифовании деталей.

Для анализа экспериментальных данных в работе используются статистические подходы, обусловленные стохастической природой процесса шлифования. Их достоинствами является возможность оценки надежности принимаемых решений, а также режущих способностей кругов не только по мерам положения, но и рассеяния. Вторая характеристика одномерного распределения частот наиболее важна при шлифовании ответственных деталей на настроенных станках с целью

Таблица 1. Частотное распределение встречаемости пикселей каждого цвета

Цвет, $i = \overline{1;15}$	Количество пикселей	RGB-код	HTML-код
1	3705906	(128, 128, 0)	#808000 olive
2	1401039	(0, 128, 0)	#008000 green
3	24061	(128, 0, 0)	#800000 maroon
4	1337730	(0, 128, 128)	#008080 teal
5	72484	(128, 128, 128)	#808080 fractal
6	25018	(255, 255, 255)	#FFFFFF white
7	20673	(192, 192, 192)	#C0C0C0 silver
8	12032	(0, 0, 0)	#000000 black
9	4415	(255, 255, 0)	#FFFF00 yellow
10	2986	(0, 0, 128)	#000080 navy
11	820	(128, 0, 128)	#800080 purple
12	224	(0, 255, 255)	#00FFFF cyan
13	65	(0, 0, 255)	#0000FF blue
14	9	(0, 255, 0)	#00FF00 lime
15	8	(255, 0, 0)	#FF0000 red

снижения вероятности брака. Полученные параметры прижогов поверхности (1) и микротвердости представляют собой случайные величины (СВ), образующие независимые множества:

$$\{y_{ev}\}, e = \overline{1;5}, v = \overline{1;n}. \quad (2)$$

В технических приложениях используют два направления статистических методов: параметрическое и непараметрическое (в частности, ранговое). Характеристиками одномерного распределения частот для (2) служат [17; 18]: средние  $\bar{y}_e = y_{e\bullet}$ , стандарты отклонений  $(SD)_e$ , размахи  $R_e = |y_{\max} - y_{\min}|_e$  – для первого направления; медианы  $\tilde{y}_e$ , квартильные широты  $KШ_e = |y_{0,75} - y_{0,25}|_e$  – для второго направления. Первая из указанных частот характеризует меру положения (опорное значение) СВ, а последующие – меры рассеяния (прецизионность). Сдвиг между  $\tilde{y}_e$  и  $y_{e\bullet}$  свидетельствует об асимметрии (скошенности) кривых распределений [17]:  $As_e = [3(y_{e\bullet} - \tilde{y}) / SD]_e, e = \overline{1;5}$ .

Параметрический метод статистики используется в том случае, когда (2) обладают свойствами гомоскедастичности (синонимы однородность или гомогенность дисперсий отклонений) и нормальности распределений. При нарушении этих ограничений рекомендуется, в частности, привлекать ранговый метод, который не связан с конкретным семейством распределений и его свойствами. В работе [17] изложены методика выбора статистического метода и последующий поиск ожидаемых средних  $\hat{y}_{e\bullet}$  и медиан  $m\hat{y}_e, e = \overline{1;5}$ . На первом этапе для (2) проводится одномерный дисперсионный анализ (ОДА) на предмет установления факта значимого различия между уровнями мер положения, а на последующем – их множественный анализ, который завершается

поиском ожидаемых аналогов для переменной  $e = \overline{1;5}$ . Обработка наблюдений (2) требует большого объема вычислений и проведена в программной среде *Statistica* 6.1.478.0. Влияние непараметрического метода на меры положения оценивается медианными коэффициентами при неизменном  $e = \overline{1;5}$ :

$$K_{me} = (\tilde{y} / y_{e\bullet})_e, \quad (3)$$

$$\hat{K}_{me} = (m\hat{y} / \hat{y}_{e\bullet})_e. \quad (4)$$

Оценку работоспособности кругов  $e = \overline{2;5}$  относительно базового ВПК 25AF46K10V5-ПО3 ( $e=1$ ) ведем для обеих характеристик одномерного распределения частот (2) [16; 19]:

$$K_e = \tilde{y}_e / \tilde{y}_1, \quad (5)$$

$$\hat{K}_e = m\hat{y}_e / m\hat{y}_1, \quad (6)$$

$$K_{cte1} = SD_1 / SD_e, \quad (7)$$

$$K_{cte2} = R_1 / R_e, \quad (8)$$

$$K_{cte3} = KШ_1 / KШ_e. \quad (9)$$

Здесь индексы  $q = \overline{1;3}$  в (7)–(9) отражают принятые меры рассеяния: 1 – по  $SD_e$ , 2 – по  $R_e$ ; 3 – по  $KШ_e$ . Если предсказаны:  $(K_e, \hat{K}_e) > 1$  и  $K_{cteq} < 1, q = \overline{1;3}$ , то меры положения и рассеяния выходных параметров процесса при шлифовании кругами  $e = \overline{2;5}$  превышают аналоги для базового ВПК 25AF46K10V5-ПО3 ( $e=1$ ) и уступают ему по выбранным критериям стабильности процесса;

в противном случае – их превосходят. Коэффициенты (4), (6)–(9) необходимы для комплексной оценки режущих способностей абразивных кругов и расширения информационной базы при многокритериальном управлении процессом шлифования с использованием моделей многомерного дисперсионного анализа с учетом конструктивных особенностей и служебного назначения деталей [14]. Опытный медианный коэффициент (3) позволяет оценить скошенность кривых распределений, а (5) – возможные ошибки при оценке режущих способностей кругов по опытным мерам положения.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера на рис. 2 представлены фотофайлы шлифованной поверхности детали  $v=9$  кругом (92A, 25A)F46L6V24. Результаты обработки фотофайлов данной детали содержатся в таблице 1, в которой зарегистрировано количество пикселей для различных цветов  $i=1;15$ . Из рис. 2 б и таблицы 1 видно, что количество пикселей прижогов  $i=1;3$  составляет: 3705906 (128, 128, 0) – *olive* для  $i=1$ ; 1401039 (0, 128, 0) – *green* для

$i=2$ ; 24061 (128, 0, 0) – *maroon* для  $i=3$ , которые расположены в последовательности снижения интенсивности прижогов. Аналогичным образом был выполнен поиск прижогов по другим опытам и кругам.

В таблице 2 показаны результаты проверки однородности дисперсий с помощью трех критериев: Хартли, Кохрена, Бартлетта; Левене и Брауна-Форсайта. Первая группа из трех статистик в программе представлена общей совокупностью. Знаки «←» в последнем столбце таблицы 2 означают, что нуль-гипотезы ( $H_0$ ) об однородности дисперсий наблюдений для обоих параметров отклонены в полном объеме. Это позволяет утверждать, что дисперсии наблюдений для прижогов и микротвердостей являются неоднородными.

Нормальность распределений ( $H_0$ ) множеств (2) проверены с помощью критерия Шапиро-Уилка. Из теоретической статистики известно, что  $H_0$  подтверждается при удовлетворении неравенств [16]:  $\alpha_e > 0,5$ ,  $e=1;5$ . Из таблицы 3 видно, что наблюдения (2) аппроксимируются кривой нормального распределения при шлифовании всеми кругами за исключением: ВПК 25AF46L10V5-КФ35 ( $e=2$ ) с уровнем надежности

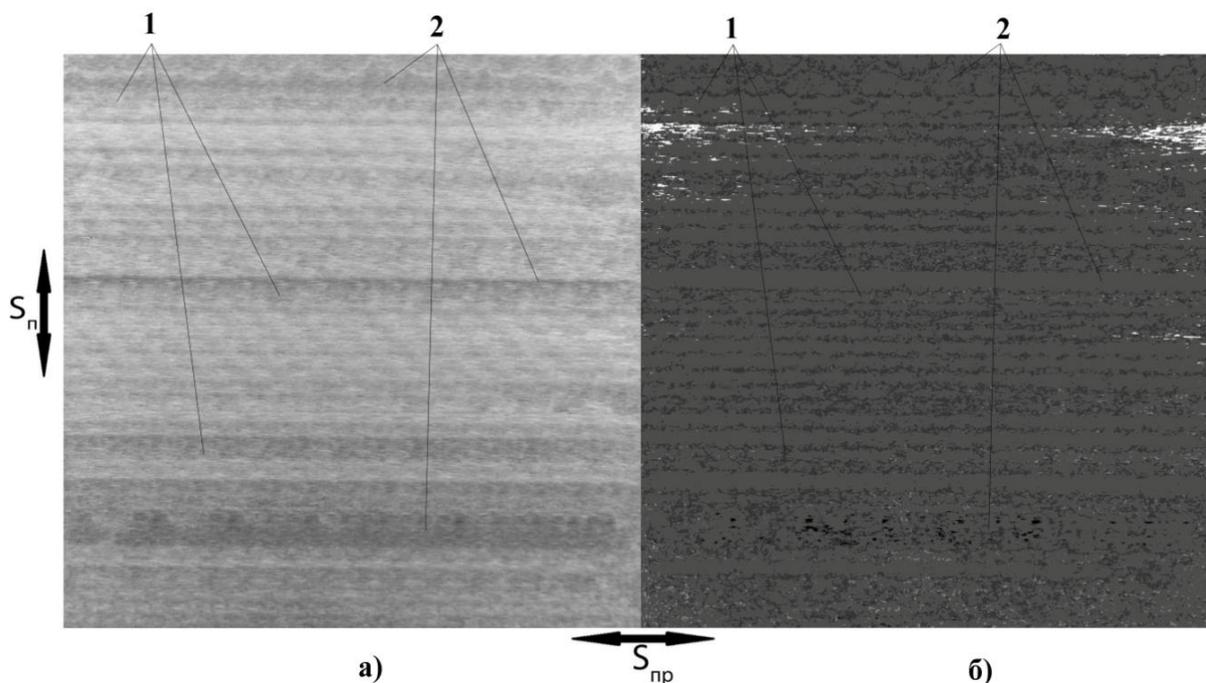


Рис. 2. Фотофайлы шлифованной поверхности детали  $v=9$  кругом (92A, 25A)F46L6V24: а – исходный фотофайл; б – фотофайл, представленный 16-тибитным цветным рисунком; 1 – участки без прижогов, 2 – с прижогами

Таблица 2. Проверка однородности дисперсий для прижогов и микротвердости при принятом уровне значимости  $\alpha=0,05$

Параметр	Критерий	Расчетный уровень значимости $\alpha$	Принятие $H_0$
$P_e$	Хартли, Кохрена, Бартлетта	0,9754	–
	Левене	0,9418	–
	Брауна-Форсайта	0,8093	–
$HV_e$	Хартли, Кохрена, Бартлетта	0,9657	–
	Левене	0,9801	–
	Брауна-Форсайта	0,9748	–

Таблица 3. Проверка нормальности распределений  $H_0$  по критерию Шапиро-Уилка

Параметр	Круги, $e = \overline{1;5}$	Расчетный уровень значимости $\alpha_e$	Принятие $H_{0e}$
$P_e$	1	0,7767	+
	2	0,1384	-
	3	0,5490	+
	4	0,8455	+
	5	0,0411	-
$HV_e$	1	0,5151	+
	2	0,7809	+
	3	0,8040	+
	4	0,3207	-
	5	0,5762	+

$\alpha_2=0,1384$  и круга ЕКЕ46К3V ( $e=5$ ) –  $\alpha_5=0,0411$  для прижогов; ВПК 25AF46M12V5-ПО3 ( $e=4$ ) –  $\alpha_4=0,3207$  для микротвердости. Нарушение однородности дисперсий для прижогов и микротвердостей, которые являются обязательными условиями применимости параметрического метода статистики, вынуждает обратиться к непараметрическому аналогу. Параметрический метод приведен в качестве справочного с целью подтверждения его несостоятельности.

На рис. 3 представлены описательные статистики прижогов (а) и микротвердостей (б) на базе непараметрического метода. На них «квадратом» выделены меры положения медиан; «прямоугольник» ограничивает КШ<sub>e</sub>, включающие 50 % наблюдений, и «усики» – размахи.

Из рис. 3 видно, что при плоском шлифовании деталей из закаленной стали 30ХГСА снижение твердости кругов сопровождается уменьшением прижогов. При этом детали, шлифуемые ВПК 25AF46M12V5-ПО3 ( $e=4$ ), имеющим самую высокую степень твердости (М), дают наибольшие прижоги  $\tilde{P}_4=43,58\%$ , а ВПК 25AF46K10V5-ПО3 ( $e=1$ ) – самым мягким кругом (К), характеризуются снижением прижогов до  $\tilde{P}_1=18\%$ . Сказанное объясняется тем, что мостики связи, скрепляющие отдельные зерна, при резании упруго деформируются. У мягких кругов данный процесс протекает в большей степени, чем у твердых, содержащих повышенное количество связи. Это позволяет выступающим зернам в мягких кругах во время работы частично вдавливаясь в его «черепок». Тогда припуск снимается большим числом равновыступающих абразивных зерен при меньшей толщине среза, в силу чего уменьшается интенсивность тепловых импульсов и температур в зоне шлифования [1].

Рис. 3 иллюстрирует, что наибольшей величине опытной медианы микротвердостей соответствует наименьшая опытная медиана прижогов деталей. Сказанное позволяет утверждать, что тепловой источник при шлифовании вызвал разупрочнение поверхностей (прижоги вторичного отпуски) закаленных деталей 30ХГСА без вторичной закалки [5; 12; 13]. Полученные результаты позволяют констатировать, что предложенный метод количественной оценки прижогов с использованием цифровых технологий по мерам положения показал высокую адекватность и может использоваться как в научных целях, так и в производственных условиях.

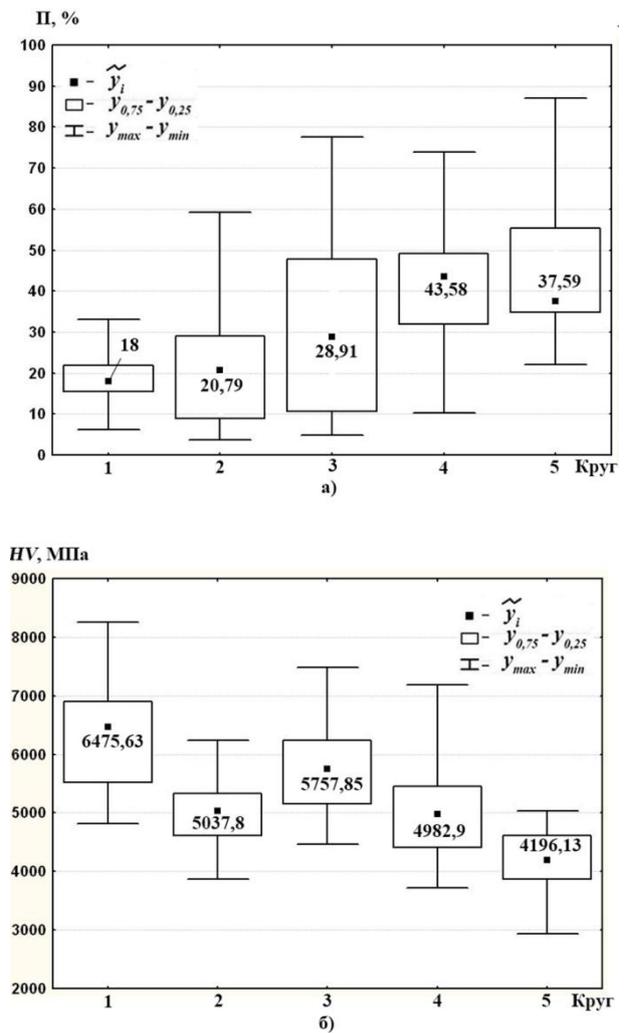


Рис. 3. Описательные непараметрические статистики для параметров  $P_e$  (а) и  $HV_e$  (б),  $e = \overline{1;5}$

В таблице 4 представлены опытные и ожидаемые меры положения для прижогов и микротвердостей деталей, шлифованных кругами  $e=\overline{1;5}$ . По опытным коэффициентам  $K_{me}$  (3) выявлено, что кривые формы распределений для параметра прижогов чаще характеризуются положительной асимметрией: в четырех из пяти случаев они предсказаны меньше единицы, а для

Таблица 4. Влияние кругов на меры положения и коэффициенты (3)–(6)

Параметр	Круги $e$	$y_{e\bullet}$	$\tilde{y}_e$	$\hat{y}_{e\bullet}$	$m\hat{y}_e$	$K_{me}(3)$	$\hat{K}_{me}(4)$	$K_e(5)$	$\hat{K}_e(6)$
$P_e, \%$	1	19,29	18,00	27,85	22,57	0,93	0,81	1,00	1,00
	2	24,41	20,79	31,54	29,77	0,85	0,94	1,16	1,32
	3	33,52	28,91	33,39	29,77	0,86	0,89	1,61	1,32
	4	42,62	43,58	35,85	32,72	1,02	0,91	2,42	1,45
	5	47,12	37,59	38,31	32,72	0,80	0,85	2,09	1,45
$HV_{e\bullet}$ МПа	1	6329,83	6475,63	6282,63	6116,74	1,02	0,97	1,00	1,00
	2	4974,54	5037,80	4998,22	5010,35	1,01	1,00	0,78	0,82
	3	5763,42	5757,85	5810,62	6116,74	1,00	1,05	0,89	1,00
	4	5021,90	4982,90	4998,22	5010,35	0,99	1,00	0,77	0,82
	5	4169,93	4196,13	4169,93	4196,13	1,01	1,01	0,65	0,69

Примечание. Круги  $e$ : 1 – 25AF46K10V5-ПО3; 2 – 25AF46L10V5-КФ35; 3 – (92А, 25А)F46L6V24; 4 – 25AF46M12V5-ПО3; 5 – ЕКЕ46К3V.

параметра микротвердостей – отрицательной асимметрией, поскольку в четырех из пяти случаев оказались больше единицы. Наименьшая опытная медиана по прижогам и наибольшая по микротвердостям получены при шлифовании ВПК 25AF46K10V5-ПО3 ( $e=1$ )– $\tilde{P}_1=18\%$ ,

$\tilde{H}V_1=6475,63$  МПа, что позволяет рекомендовать его для шлифования деталей из закаленной стали 30ХГСА. Наихудшие результаты по состоянию поверхности имеют место при работе кругами: по прижогам – 25AF46M12V5-ПО3 ( $e=4$ ) при  $\tilde{P}_4=43,58\%$ ; по микротвердостям – ЕКЕ46К3V ( $e=5$ ) при  $\tilde{H}V_5=4196,13$  МПа. В общем случае следует констатировать, что для кругов  $e=2;5$  опытные медианы  $\tilde{P}_e$  возрастают по сравнению с базовым  $e=1$ : в 1,16 раза для ВПК 25AF46L10V5-КФ35 ( $e=2$ ); в 1,61 раза для круга (92А, 25А)F46L6V24 ( $e=3$ ); в 2,42 раза для ВПК 25AF46M12V5-ПО3 ( $e=4$ ) и в 2,09 раза для круга ЕКЕ46К3V. По опытным медианам микротвердостей круги  $e=1; 3; 4; 5$  образуют соответственно убывающую последовательность от 6475,63 до 4196,13 МПа, а круг  $e=2$  занимает третью позицию при  $\tilde{H}V_2=5037,8$  МПа. По прогнозируемым мерам положения отмеченные тенденции выглядят менее убедительно, поскольку некоторые из ожидаемых опорных значений представлены общими величинами мер положения для равноценных кругов по режущим свойствам.

Как видно из таблицы 4, они зависят от выходного параметра процесса. По прижогам к ним относятся круги  $e=2;3$  ( $m\hat{P}_\bullet=29,77\%$ ) и круги  $e=4;5$  ( $m\hat{P}_\bullet=32,72\%$ ), а по микротвердостям – круги  $e=1;3$  ( $m\hat{H}V_\bullet=6116,74$  МПа) и круги  $e=2;4$  ( $m\hat{H}V_\bullet=5010,35$  МПа).

Из таблицы 4 видно, что при плоском шлифовании деталей из закаленной стали 30ХГСА ВПК из электрокорунда белого 25А ( $e=1; 2; 4$ ) и кругом (92А, 25А) обладают преимуществами перед инструментом из монокорунда ( $e=5$ ). При этом детали при шлифовании кругом ЕКЕ46К3V имеют наибольшие прижоги  $m\hat{P}_5=32,72\%$  и наименьшую микротвердость  $m\hat{H}V_5=4193,13$  МПа. Преимущества кругов  $e=1;4$  перед кругом из монокристаллического корунда следует объяснить тем, что радиус округления зерен электрокорунда белого меньше, чем у зерен монокорунда. Они содержат большее количество острых вершин: 20% – для 25А, 11% – для зерен монокорунда [20]. В то же время зерна 25А имеют твердость по Моссу 9,03, а монокристаллический корунд – 9. Все вместе изложенное позволяет им легче внедряться в металл и снижать температуру шлифования и прижоги на поверхности деталей.

В таблице 5 представлены результаты оценки стабильности образования прижогов и формирования

Таблица 5. Оценка режущих способностей кругов по мерам рассеяния и коэффициентам стабильности (7)–(9)

Параметр	Круги $e$	$SD_e$	$R_e$	$KШ_e$	$K_{стаб}$		
					$q=1(7)$	$q=2(8)$	$q=3(9)$
$P_e, \%$	1	7,34	26,98	6,34	1,00	1,00	1,00
	2	19,18	55,57	20,27	0,38	0,49	0,31
	3	24,65	72,89	37,08	0,30	0,37	0,17
	4	17,70	63,75	17,08	0,41	0,42	0,37
	5	22,82	65,00	20,49	0,32	0,42	0,31
$HV_{e\bullet}$ МПа	1	914,123	3443,68	1384,40	1,00	1,00	1,00
	2	589,657	2364,95	723,80	1,55	1,46	1,91
	3	755,362	3020,95	1082,00	1,21	1,14	1,28
	4	777,392	3466,58	1041,00	1,18	0,99	1,33
	5	536,993	2098,33	742,15	1,70	1,64	1,87

Примечание. Круги  $e$ : 1 – 25AF46K10V5-ПО3; 2 – 25AF46L10V5-КФ35; 3 – (92А, 25А)F46L6V24; 4 – 25AF46M12V5-ПО3; 5 – ЕКЕ46К3V.

микротвердостей. По результатам ОДА и множественного анализа (2) предпочтение отдано квартильным широтам и полученным на их базе коэффициентам  $K_{\text{тез}}$ ,  $e=1;5$ . Выявлено, что наилучшая стабильность процесса по прижогам предсказана при шлифовании ВПК 25AF46K10V5-ПОЗ ( $e=1$ ) –  $KШ_1=6,34\%$ , наихудшая – для круга из хромтитанистого электрокорунда (92А, 25А)F46L6V24 ( $e=3$ ) –  $KШ_3=37,08\%$ . Круги  $e=4; 2; 5$  последовательно занимают второе, третье и четвертое места. Параметрический метод «на чужом поле» показал близкие результаты. По непараметрической мере рассеяния микротвердостей наилучшая стабильность процесса предсказана при шлифовании ВПК 25AF46L10V5-КФ35 ( $e=2$ ) –  $K_{\text{ст}23}=1,91$  и кругом ЕКЕ46К3V ( $e=5$ ) –  $K_{\text{ст}53}=1,87$ . Третья и четвертая позиции отданы последовательно ВПК 25AF46M12V5-ПОЗ ( $e=4$ ) и кругу (92А, 25А)F46L6V24 ( $e=3$ ). Наихудшие результаты показал ВПК 25AF46K10V5-ПОЗ ( $e=1$ ) –  $K_{\text{ст}13}=1$ , который по мерам положения признан наилучшим. Сказанное относительно стабильности процесса по прижогам и микротвердостям наглядно иллюстрирует рис. 3.

Считаем, что точность измерений микротвердости выше по сравнению с прижогам. При этом дополнительно увеличен объем выборки с 10 до 30 опытов. В связи с изложенным окончательные выводы по стабильности работы кругов целесообразно вести по  $KШ_e$ , полученным для микротвердости. По результатам данного эксперимента метод поиска процентного содержания прижогов следует использовать для оценки мер положения и выявления физических явлений шлифования, протекающих в зоне резания.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Подтверждена целесообразность привлечения методики количественного контроля прижогов с использованием цифровых технологий, которая апробирована при плоском шлифовании закаленных деталей из стали 30ХГСА.

2. Возрастание прижогов, сопровождаемое снижением микротвердости поверхности, свидетельствует о том, что при шлифовании деталей доминирует тепловое разупрочнение поверхности без вторичной закалки. Для их снижения целесообразно использовать круги меньшей твердости.

3. Установлено, что наибольшее снижение прижогов обеспечивает ВПК 25AF46K10V5-ПОЗ, а наибольшую прецизионность процесса – ВПК 25AF46L10V5-КФ35.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эльянов В.Д., Куликов В.Н. Прижоги при шлифовании. М.: НИИМАШ, 1974. 63 с.
2. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
3. Рудометов Ю.И. Применение абразивных инструментов, пропитанных суспензиями импрегнаторов // СТИН. 2012. № 11. С. 34–37.
4. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
5. Лебедев В.Г., Клименко Н.Н., Аль-Аджейлат С.А. Механизм образования прижогов при шлифовании деталей из закаленных сталей // НАУКОВИ НОТАТ-КИ: міжвуз. зб. 2013. Вып. 40. С. 141–143.
6. Аль-Аджейлат С.А., Лебедев В.Г. Формирование прижогов отпуска при шлифовании направляющих тяжелых прессов кругами из КНБ // Проблемы техники. 2007. № 4. С. 128–150.
7. Аль-Аджейлат С.А., Лебедев В.Г. Энергетические условия образования прижогов закалки при шлифовании направляющих тяжелых прессов кругами КНБ // Проблемы техники. 2008. № 1. С. 130–152.
8. ANSI/AGMA 2007-B92. Surface Temper Etch Inspection After Grinding, 1992.
9. Кочаров Э.А., Олешко В.С. Неразрушающий способ экспрессного выявления зон на поверхности металлических деталей со шлифовочными или эксплуатационными прижогам: патент РФ № 2407996; заявл. № 2008129897/28 от 27.01.2010.
10. Медведев М.Н., Мельникова Е.Н. Способ выявления прижогов на металлах, например на титане и его сплавах, и вещество для его осуществления: патент РФ № 2044302; заявл. № 92015489/25 от 30.12.1992.
11. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 527 с.
12. Shaw B.A., Evans J.T., Wojtas A.S., Suominen L. Grinding process control using the magnetic Barkhausen noise method // Electromagnetic nondestructive evaluation (II). Italy, 1998. P. 82–91.
13. Суоминен Л. Обнаружение дефектов шлифования деталей из ферромагнитных материалов с использованием эффекта Баркгаузена // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 2. С. 74–78.
14. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Нгуен В.Л. Количественная оценка прижогов при плоском шлифовании закаленных деталей из стали 40Х абразивными кругами различной пористости // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2015. № 1. С. 6–19.
15. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю. Подходы к оценке опорной части поверхности шлифованных плоскостей титановых деталей абразивными кругами Norton // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. № 5. С. 142–150.
16. Солер Я.И., Лгалов В.В. Изучение микротвердости формообразующих деталей штамповой оснастки при абразивном шлифовании // Вестник ИрГТУ. 2012. № 7. С. 48–54.
17. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
18. Hollander M., Wolfe D.A. Nonparametric statistical methods. 2nd ed. New York: Willy-Interscience, 1999. 787 p.
19. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 2. Основной метод определения повторяемости воспроизводимости стандартного метода измерений. М.: Изд-во стандартов, 2002. 58 с.
20. Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 616 с.

## REFERENCES

1. Elyanov V.D., Kulikov V.N. *Prizhogi pri shlifovanii* [Burns while grinding]. Moscow, NIIMASh publ., 1974, 63 p.
2. Suslov A.G., ed. *Inzheneriya poverkhnosti detaley* [Parts surface engineering]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2008, 320 p.
3. Rudometov Yu.I. Application of abrasive tools saturated with the impregnator suspension. *STIN*, 2012, no. 11, pp. 34–37.
4. Maslov E.N. *Teoriya shlifovaniya materialov* [Theory of materials grinding]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1974, 320 p.
5. Lebedev V.G., Klimenko N.N., Al-Adjelat S.A. Mechanism of formation of burn marks when grinding parts of hardened steel. *Naukovi notatki: mizhvuz. zbirnik*, 2013, no. 40, pp. 141–143.
6. Al-Adjelat S.A., Lebedev V.G. Tempering burn formation when grinding heavy presses slideways by CBN wheels. *Problemi tekhniki*, 2007, no. 4, pp. 128–150.
7. Al-Adjelat S.A., Lebedev V.G. Energy conditions for hardening burns formation when grinding heavy presses slideways by CBN wheels. *Problemi tekhniki*, 2008, no. 1, pp. 130–152.
8. ANSI/AGMA 2007-B92. Surface Temper Etch Inspection After Grinding, 1992.
9. Kocharov E.A., Oleshko V.S. *Nerazrushayushchiy sposob ekspressnogo viyavleniya zon na poverkhnosti metallicheskih detaley so shlifovochnimi ili ekspluatatsionnimi prizhogami* [Nondestructive method of express-determination of areas on metal parts surface with grinding or operating burns]. Patent RF no. 2407996, 2010.
10. Medvedev M.N., Melnikov E.N. *Sposob viyavleniya prizhgov na metallakh, naprimer na titane i ego splavakh, i veshchestvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of determination of burns on metals, for example, titanium and its alloys, and the substance for its implementation]. Patent RF no. 2044302, 1992.
11. Geller Yu.A. *Instrumentalnie stali* [Instrument steels]. Moscow, Metallurgiya publ., 1983, 527 p.
12. Shaw B.A., Evans J.T., Wojtas A.S., Suominen L. Grinding process control using the magnetic Barkhausen noise method. *Electromagnetic nondestructive evaluation (II)*. Italy, 1998, pp. 82–91.
13. Suominen L. Detecting Grinding Damage in Gears with the Barkhausen Noise. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2011, no. 2, pp. 74–78.
14. Soler Y.I., Kazimirov D., Nguyen V.L. Quantitative assessment of burns while flat grinding hardened parts made of steel 37Cr4 by abrasive wheels of different porosity. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenti)*, 2015, no. 1, pp. 6–19.
15. Soler Y.I., Kazimirov D.Y. Principles for the estimation of a bearing area of polished planes of titanium parts by abrasive wheels Norton. *Fundamentalnie i prikladnie problemi tekhniki i tekhnologii*, 2014, no. 5, pp. 142–150.
16. Soler Y., Lgalov V. Study of shaping die tooling parts microhardness abrasive grinding. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 7, pp. 48–54.
17. Zaks L. *Statisticheskoe otsenivanie* [Statistical estimation]. Moscow, Statistika publ., 1976, 598 p.
18. Hollander M., Wolfe D.A. *Nonparametric statistical methods*. 2nd ed. New York, Willy-Interscience, 1999, 787 p.
19. *GOST R ISO 5725-2-2002*. Accuracy (trueness and precision) of methods and measurements results. P.2. Key method of determination of reproducibility repeatability of standard method of measurements. Moscow, Izdatelstvo standartov publ., 2002, 58 p. (In Russian).
20. Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniya metallov* [Technology of metals grinding]. Stariy Oskol, TNT publ., 2013, 616 p.

## SELECTION OF ABRASIVE WHEELS ACCORDING TO THE GRINDING BURNS OF HARDENED PARTS USING DIGITAL TECHNOLOGIES

© 2015

*Ya.I. Soler*, candidate of technical sciences,  
assistant professor of the Department «Mechanical Engineering Technology»

*D.Yu. Kazimirov*, candidate of technical sciences,  
assistant professor of the Department «Mechanical Engineering Technology»

*V.L. Nguyen*, postgraduate student of the Department «Mechanical Engineering Technology»  
*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk (Russia)*

*Keywords:* grinding; burns; microhardness; statistics; average; median; process precision; digital technologies.

*Abstract:* The authors developed the procedure of quantitative assessment of grinding burns on the base of digital technologies. This procedure includes three steps: macrophotography of original surface in the reflected light rays; its digitization using *Adobe Photoshop CS6 13.1.2* software and its conversion in the form of raster images of different colours. The advantages of this method are: low labor input, environmental safety and the possibility of wide use for any scientific purpose and in any industrial conditions. It was tested within the pendulum grinding of flat parts made of 30ChGSA hardened steel ( $\sigma_{UST}=1080$  MPa,  $\delta_E=10\%$ ). The parts were ground by different against grains, hardness and porosity wheels: 25AF46K10V5-PO3, 25AF46L10V5-KF35, (92A, 25A)F46L6V24, 25AF46M12V5-PO3, EKE46K3V.

To prove the reliability of this innovative technology of grinding burns assessment, the authors carried out the study of parts microhardness. Taking into account the stochastic nature of grinding, to process the observation results on both grinding output parameters, the authors used the statistical methods which are divided into parametric and nonparametric (in particular, the rank methods). Statistical methods are. The advantages of these methods are the possibility of taking statistical decisions with the given reliability, as well as the assessment of cutting wheels ability not only according to the position measures (averages, medians), but also according to the measures of dispersion: deviations standards, ranges and quartile latitudes. The measure of one-dimension latitudes dispersion is more important while grinding essential parts on pre-set machines to reduce the probability of rejected parts. The study showed that in the conditions of homoscedasticity and normality of distributions violations, it is necessary to use the non-parametric method, wherein the medians and quartile latitudes are used as one-dimensional frequency distributions. The authors revealed the correlation between the position measures for burn density and microhardness while grinding by abrasive wheels using the mode:  $v_c=35$  m/s,  $s_{lo}=7$  m/min,  $s_{tr}=1$  mm/double pass,  $t=0,015$  mm,  $z=0,15$  mm, when the increase of burns is accompanied by the reduction of 30ChGSA parts microhardness. The best results according to the position measures were shown by 25AF46K10V5-PO3 wheel, and according to the grinding accuracy – 25AF46L10V5-KF35 wheel